Fotovoltaïsche cellen

Fotovoltaïsche cellen vormen niet alleen de basis van de zonnepanelen op onze daken, maar worden bijvoorbeeld ook toegepast in accugevoede tuin- en gevellampen. In dit artikel geven wij een overzicht van de soorten met hun eigenschappen.

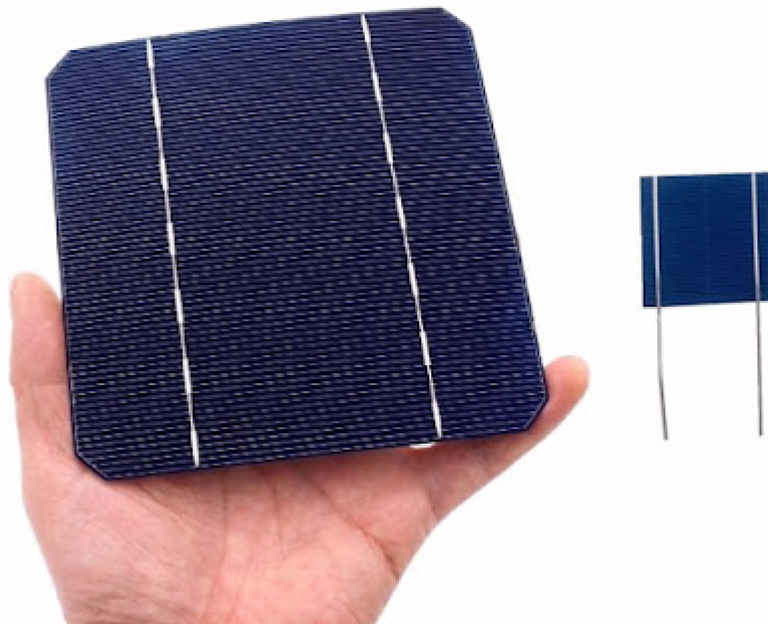
Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 23-10-2024

Inleidende begrippen

PV-cel
In het Engels wordt een fotovoltaïsche cel een '***p**hoto**v**oltaic cel*' genoemd. Vandaar dat deze cellen vaak worden aangeduid met het woord '*PV-cel*'.

Wat is een PV-cel?
Een fotovoltaïsche cel is een elektronisch halfgeleidend onderdeel dat elektromagnetische straling omzet in elektrische gelijkspanning. Vandaar dat deze cellen ook wel '*zonnecellen*' worden genoemd hoewel dit een onnauwkeurige benaming is. Het onderdeel trekt zich namelijk niets aan van de bron van de straling, maar alleen van de golflengte. Een PV-cel zal ook spanning genereren als u het belicht met het licht van een witte lamp. Bovendien zijn er ook PV-cellen die voornamelijk gevoelig zijn voor IR-straling.
Een PV-cel wordt '*halfgeleidend*' genoemd omdat de cel is gebaseerd op een stuk halfgeleidend materiaal met een pn-overgang, net zoals een diode. Als die pn-overgang wordt getroffen door elektromagnetische straling van de juiste golflengte worden er elektronen uit de laag vrijgemaakt, die zorgen voor het potentiaal verschil tussen de twee aansluitingen van de cel. De halfgeleidende werking van de cel heeft tot gevolg dat stroom maar in één richting door de cel kan vloeien. De spanning die een PV-cel kan leveren is zeer klein en ligt rond 0,5 V. De stroom die de cel kan leveren kan echter wél fors zijn.

Stroom hangt af van de afmetingen van de cel
Fotovoltaïsche cellen worden gemaakt met een oppervlakte van slechts een paar cm² tot meer dan 200 cm². Die kleine cellen hebben specifieke toepassingen, zoals draagbare zonne-opladers of geïntegreerde cellen in gadgets.
In de onderstaande foto worden de afmetingen van twee fotovoltaïsche cellen vergeleken. Links ziet u een cel van 15 cm bij 15 cm, rechts eentje van 52 mm bij 52 mm. De linker levert een spanning van 0,67 V bij een stroom van 9,4 A, dus een maximaal vermogen van 6,3 W. De rechter levert een spanning van ongeveer 0,5 V bij een stroom van 0,86 A, dus een maximaal vermogen van 0,43 W.



De afmetingen van twee fotovoltaïsche cellen vergeleken.
(© 2024 Jos Verstraten)

In serie schakelen
Identieke PV-cellen kunt u zonder problemen in serie schakelen, waardoor de geleverde spanning toeneemt. Op deze manier is het zonder veel extra elektronica mogelijk een kleine accu in een apparaat op te laden. Vandaar dat de bekende Chinese tuinlampjes zo goedkoop aangeboden kunnen worden.

Fotovoltaïsche cel, de basis van ieder zonnepaneel
Een fotovoltaïsche cel is iets anders dan een zonnepaneel! Zonnepanelen zijn samengesteld uit een heleboel identieke PV-cellen die in serie worden geschakeld om de noodzakelijke spanning op te wekken. Over het algemeen hebben de standaard fotovoltaïsche cellen die worden gebruikt in de zonnepanelen op uw dak een formaat van ongeveer 15 bij 15 centimeter tot 20 bij 20 centimeter. Deze cellen worden samengevoegd tot een groter paneel, dat meestal een standaard afmeting heeft van 1 meter bij 1,6 meter of 1 meter bij 2 meter. Deze panelen leveren een spanning van 40 V tot 60 V en worden dan nog eens in serie geschakeld om een gelijkspanning te leveren die hoog genoeg is om via de omvormer te worden omgezet in een 230 V wisselspanning. Een dergelijke combinatie levert een open-klem spanning die wel 360 V_{dc} kan bedragen, dat is dus opletten geblazen!
Er bestaan natuurlijk ook zogenaamde '*12 V zonnepanelen*'. Deze zijn bedoeld voor gebruik in caravans, campers en pleziervaartuigen om de 12 V accu op te laden en leveren een spanning van maximaal 19,8 V. Er worden ook 24 V panelen aangeboden voor het opladen van zwaardere accugevoede systemen.

Soorten PV-cellen
Lang waren de cellen uit silicium de enigen die betrouwbaar werkten. De snelle groei van het toepassen van zonnepanelen door particuliere woningbezitters heeft er uiteraard toe geleid dat er flink wat researchgeld wordt gestopt in het zoeken naar nieuwe materialen die goedkoper, duurzamer en met een hoger rendement elektromagnetische straling omzetten in elektrische energie.
Het lijstje van momenteel of binnenkort beschikbare fotovoltaïsche cellen is best wel indrukwekkend:

- Monokristallijne cellen (C-Si)
- Polykristallijne cellen (MC-Si)
- Verbeterde kristallijne cellen (PERL)
- Amorfe silicium cellen (A-Si)
- Koper, indium en selenium cellen (CIS)
- Koper, indium, gallium en selenium cellen (CIGS)
- Cadmiumtelluride cellen (CdTe)

- Organische fotovoltaïsche cellen (OSC)
- Perovskiet cellen (PSC)
- Kwantum dot cellen (QDSC)
- Multi-junction cellen (MJ)

Het foto-voltaïsch effect

De ontdekking

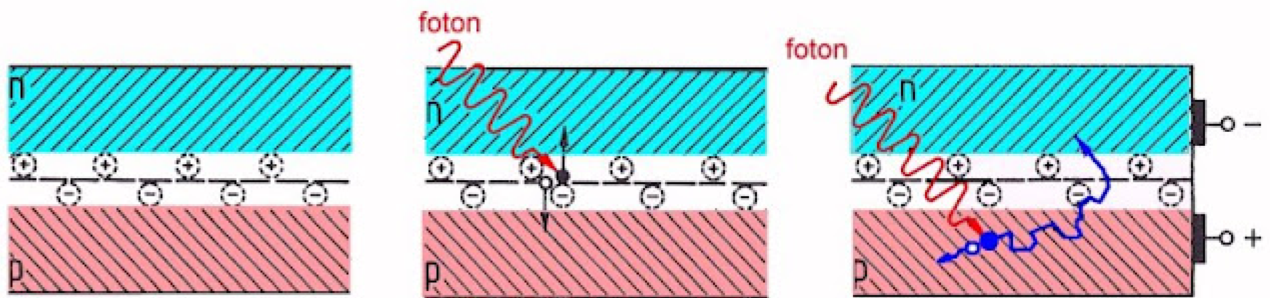
Het woord '*fotovoltaïsch*' is samengesteld uit het Oudgrieks woord (φώς, phōs) en uiteraard de naam van de beroemde natuurkundige Volta. Het foto-voltaïsch effect werd reeds in 1839 ontdekt door de fysicus A. E. Becquerel. Op dat moment kon men echter met dit effect erg weinig in de praktijk beginnen.
Nu ligt dat heel anders! De eerste praktisch bruikbare PV-cel werd in 1883 door Charles Fritts gemaakt. Hij maakte een halfgeleider door een dun plaatje selenium te bedekken met een uiterst dunne laag goud. Op die manier werd de halfgeleidende junctie gevormd. Deze eerste cel had een rendement van slechts 1 %. Russell Ohl ontdekte de pn-junctie in 1939 en hij patenteerde de moderne zonnecel in 1946.
Het moderne tijdperk begon in 1954 toen bij de Bell Laboratories werd ontdekt dat silicium erg gevoelig is voor licht als het bepaalde onzuiverheden bevat. De ontdekking leidde tot de productie van de eerste praktisch bruikbare zonnecel met een rendement van ongeveer 6 %.

Wat is het rendement van een PV-cel?

In de voorgaande paragraaf werd dit begrip geïntroduceerd. Het rendement is een getal dat aangeeft hoeveel procent van de invallende licht-energie wordt omgezet in elektrische energie. Moderne PV-cellen halen een rendement van ongeveer 22 %. Het rendement van een PV-cel is echter niet zo gemakkelijk meetbaar omdat een heleboel externe factoren een rol spelen. De temperatuur van de cel is bijvoorbeeld een zeer belangrijke factor bij het bepalen van het rendement. Het rendement daalt naarmate de temperatuur van de cel stijgt. Ook de spectrale samenstelling van het licht waarmee de PV-cel wordt beschenen is een belangrijke factor bij het bepalen van het rendement.

De fysische werking

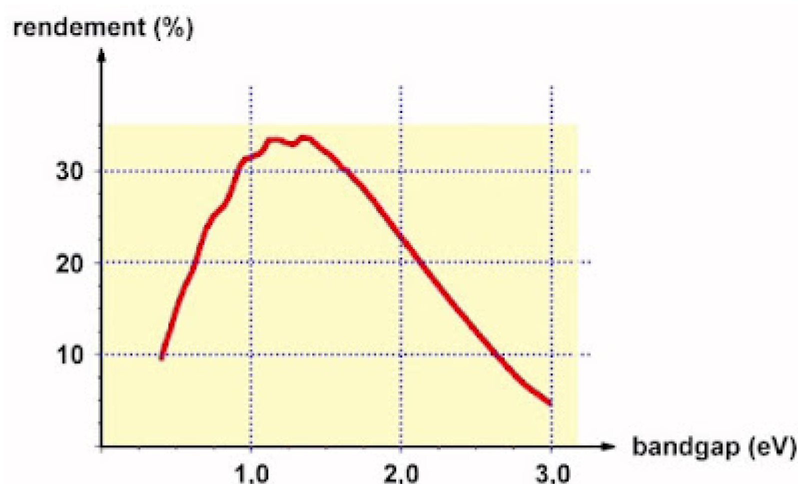
PV-cellen zijn eigenlijk eenvoudige halfgeleiders, net zoals dioden en transistoren. PV-cellen bestaan uit een enkelvoudige np-overgang, zoals getekend in de linker schets van de onderstaande figuur. Stel dat gebruik wordt gemaakt van silicium als basismateriaal. Een PV-cel wordt dan gemaakt door een uiterst dun plaatje silicium (200 á 400 µm) aan weerszijden te doteren met een donor- en een acceptor-materiaal. Silicium is een stof die vier vrije elektronen heeft. Als nu aan één zijde wordt gedoteerd met een stof die slechts drie vrije elektronen heeft en aan de andere zijde met een stof die vijf vrije elektronen heeft, wordt het ladingsevenwicht in het plaatje silicium verstoord.
Aan de ene kant ontstaat een overschot aan vrije elektronen, aan de andere kant een tekort. Er ontstaan in het plaatje twee gebieden waarin zich zogenoemde '*vrije ladingsdragers*' bevinden. Aan de ene kant zijn dat uiteraard de negatief geladen elektronen, voorgesteld door de cirkeltjes met een - er in. Aan de andere kant zijn dat de zogenoemde '*gaten*', plaatsen waar elektronen ontbreken en die een positieve lading hebben. Deze vrije ladingsdragers worden voorgesteld door een cirkeltje met een + er in.
Nu zouden de vrije elektronen best willen migreren naar het gebied met positieve vrije ladingsdragers. Daarvoor moet echter een energie-barrière overwonnen worden en de vrije elektronen hebben daarvoor te weinig energie. De grootte van die barrière (de '*bandgap*') wordt uitgedrukt in eV (elektronvolt) is alleen afhankelijk van de atomaire samenstelling van het materiaal. Het gevolg is dat er op de grenslaag tussen de n- en p-zones een elektrisch veld ontstaat.



De fysische werking van een fotovoltaïsche cel. (© 2024 Jos Verstraten)

Stel nu dat er, zoals getekend in het middelste schetsje van de bovenstaande figuur, zonnestraling invalt op de cel. Volgens de kwantummechanica kunt u elektromagnetische straling voorstellen door een stroom fotonen. Dat zijn imaginaire deeltjes zonder massa die een energie hebben die afhankelijk is van de golflengte van de straling. Als zo'n foton invalt op de sperlaag van de PV-cel kan het gebeuren dat er een botsing ontstaat tussen het foton en de gedoteerde siliciumstructuur. Door deze botsing wordt een elektron uit een atoom bevrijd. Dat nu vrije elektron neemt de volledige energie van het foton over. Dat is een gevolg van de kwantummechanica, die stelt dat energie alleen in bepaalde kwanten of hoeveelheden kan voorkomen en uitgewisseld worden.
Het foton houdt dan op te bestaan, men zegt dat het volledig geabsorbeerd is door het elektron. Daardoor krijgt het elektron voldoende energie om door de ladingsbarrière heen te breken. Natuurlijk gebeurt dit proces niet eenmalig, maar miljarden keer zolang er fotonen op de PV-cel vallen. Op deze manier ontstaat er een continue stroom van vrije ladingsdragers, die tot gevolg heeft dat er ook door de op de cel aangesloten belasting een elektronenstroom gaat vloeien.

De Shockley-Queisser-limiet
De theoretische prestatie van een zonnecel werd voor het eerst diepgaand bestudeerd in de jaren zestig van de vorige eeuw. In de natuurkunde wordt met het begrip '*Shockley-Queisser-limiet*' de maximale theoretische efficiëntie aangegeven van een zonnecel die gebruik maakt van een enkele pn-overgang. Deze limiet werd voor het eerst berekend door William Shockley en Hans-Joachim Queisser in 1961, wat een maximale efficiëntie van 30 % bij 1,1 eV bandgap opleverde. Deze theoretische berekening legt een fundamentele grens vast voor de productie van zonne-energie met fotovoltaïsche cellen.
Let er echter goed op dat de Shockley-Queisser-limiet alleen geldt voor conventionele zonnecellen met een enkele pn-overgang. Zonnecellen met meerdere lagen kunnen deze limiet overtreffen. De theoretisch te berekenen extreme limiet, voor een zonnecel met meerdere overgangen en een oneindig aantal lagen, bedraagt 68,7 % voor normaal zonlicht en 86,8 % bij gebruik van geconcentreerd zonlicht.



De *Shockley-Queisser-limiet geeft de maximaal mogelijke efficiëntie van een PV-cel.*
(© 2011 Sbyrnes321 - edit 2024 Jos Verstraten)

De vervaardiging van het basismateriaal silicium
Op dit moment is silicium nog steeds het meest gebruikte basismateriaal voor de PV-cellen die in zonnepanelen zitten. Dit element hoeft voor deze toepassing echter niet zo zuiver te zijn als het silicium dat bestemd is voor transistoren en chip's. Afhankelijk van het soort PV-cel heeft men monokristallijn, polykristallijn, Sliver of amorf silicium nodig.

Monokristallijn silicium (C-Si)
Monokristallijn silicium (C-Si) wordt meestal door middel van het zogenaamde '*Czochralski*'-proces gemaakt. In een vat met gesmolten silicium wordt een roterende staaf gestoken met als punt een Si-kristal. Die staaf wordt langzaam omhoog getrokken. Het gesmolten silicium dat zich afzet op de staaf neemt de kristalstructuur van de punt over. Het resultaat is een groot cilindervormig Si-kristal. Dit kan nadien in dunne plakjes, de zogenoemde '*wafers*', worden gesneden of gezaagd. Deze wafers zijn cirkelvormig en ongeveer 0,3 mm dik, vandaar dat er een heleboel goedkope ronde PV-cellen worden aangeboden.



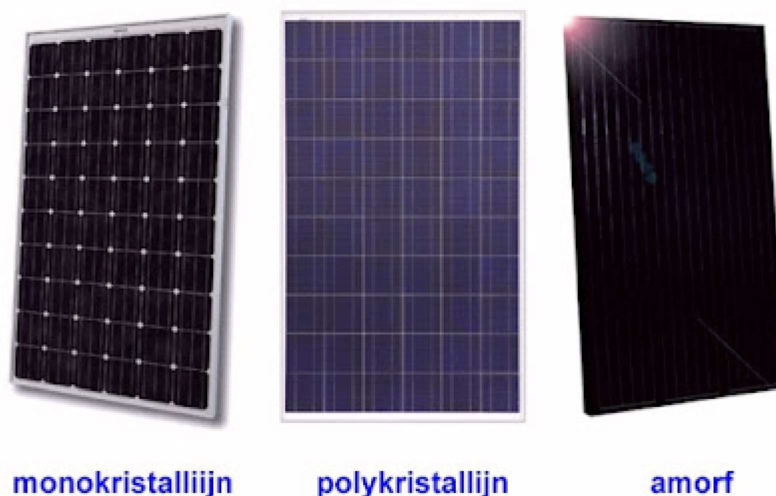
Het resultaat van het 'Czochralski'-proces.
(© Saperaud, Wikimedia Commons - edit 2024 Jos Verstraten)

Polykristallijn silicium (MC-Si)
Polykristallijn silicium (MC-Si) wordt geproduceerd door vloeibaar silicium in een vierkante gietvorm te gieten. Die gietvorm wordt nadien heel langzaam afgekoeld tot het silicium is gestold. Bij dit proces is het de bedoeling dat er een regelmatig patroon van Si-kristallen ontstaat in de plak gestold silicium. Dat gaat echter zelden helemaal goed, er ontstaan donkere plekken waar het kristal-raster is verstoord door onzuiverheden in de gietmassa. Het gevolg is dat het rendement van de uit een dergelijke plak vervaardigde PV-cellen lager is dan bij monokristallijn silicium het geval is. Uit de kubus van gestold silicium worden weer zeer dunne plakjes gezaagd die de basis vormen van de cellen. Vaak zijn die plakjes maar 250 µm dik! De goedkope Chinese zonnepanelen die op dit moment in grote getale op de Europese markt worden gedumpt worden allemaal gemaakt uit dergelijk polykristallijn silicium. Het productieproces is immers aanzienlijk goedkoper dan dat van monokristallijn silicium.
Polykristallijne cellen worden overigens ook vaak vervaardigd van restanten silicium die opnieuw gesmolten worden. Deze restanten kunnen bijvoorbeeld afkomstig zijn uit de computerchip industrie of van het afval dat vrijkomt bij het bijsnijden van monokristallijne cellen.

Sliver-silicium
Sliver-silicium ontstaat als men monokristallijn silicium in uiterst dunne plakjes verzaagt. Die plakjes zijn zo dun dat zij nog licht doorlaten. Zij worden toegepast in de moderne versies van zonnepanelen, die bijvoorbeeld worden toegepast in halfdoorzichtige gevels van gebouwen. Sliver-silicium werkt dubbelzijdig: het licht kan er langs beide zijden op invallen.

Amorf silicium (A-Si)
Amorf silicium (A-Si) heeft geen kristalstructuur, maar is onregelmatig gevormd. Hierdoor is het rendement van de PV-cellen veel lager dan bij de andere productie-processen. Het is echter wél de goedkoopste manier voor het maken van silicium dat geschikt is voor het genereren van het foto-voltaïsch effect. Amorf silicium is alleen bruikbaar voor het maken van PV-cellen waarbij de gevoelige laag is opgedampt. Er wordt gewerkt met een gasvormige Si-verbinding, meestal SiH_4, in combinatie met zuiver waterstof gas (H_2). Deze gassen slaan neer op een drager en vormen daarop een uiterst dunne gevoelige laag. Amorf silicium is zeer gevoelig voor het zichtbare licht, maar is ongevoelig voor het infrarode deel van de invallende straling.

Herkenning van de cellen
Monokristallijne zonnepanelen kunt u herkennen aan de zwarte kleur en doordat ze vaak uit kleine vierkantjes bestaan. Polykristallijne zonnepanelen herkent u aan de blauwe kleur. Amorfe cellen zijn helemaal egaal zwart met een donkerblauwe reflectie.



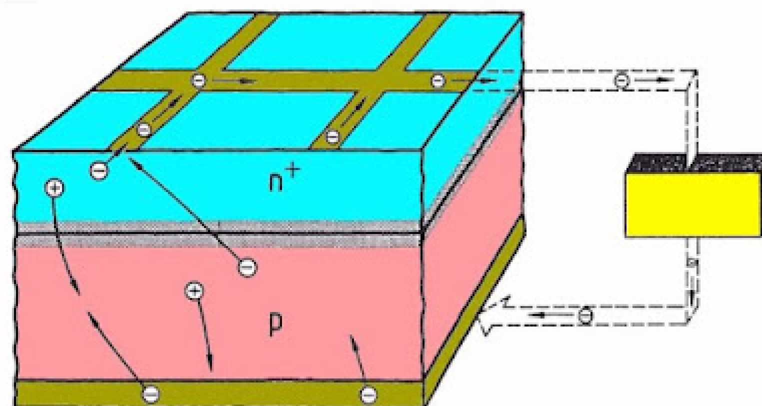
De drie soorten fotovoltaïsche cellen. (© acmodules.nl)

De spectrale gevoeligheid van PV-cellen
De spectrale gevoeligheid van een PV-cel hangt af van het materiaal waaruit de cel is gemaakt. Zoals reeds beschreven moet een vrije ladingsdrager een bepaalde energie-barrière overwinnen. Bij silicium bedraagt deze barrière 1,1 eV (elektronvolt). Tussen de energie van een foton en de golflengte ervan bestaat de volgende relatie:
$\lambda = 1{,}24 / E$
Hierin staat λ voor de golflengte in µm en E voor de energie in eV. Uit deze formule kunt u afleiden dat de optimale golflengte van de op een silicium zonnecel invallende fotonen gelijk moet zijn aan 1,1 µm. Fotonen met langere golflengten hebben een te kleine energie-inhoud om vrije ladingsdragers over de barrière te helpen. Fotonen met kleinere golflengten dringen te diep in het materiaal door, waardoor de kans groot is dat een losgeslagen elektron zich weer met een atoom verenigt alvorens het door de barrière is gedrongen.

Monokristallijne cellen (C-Si)

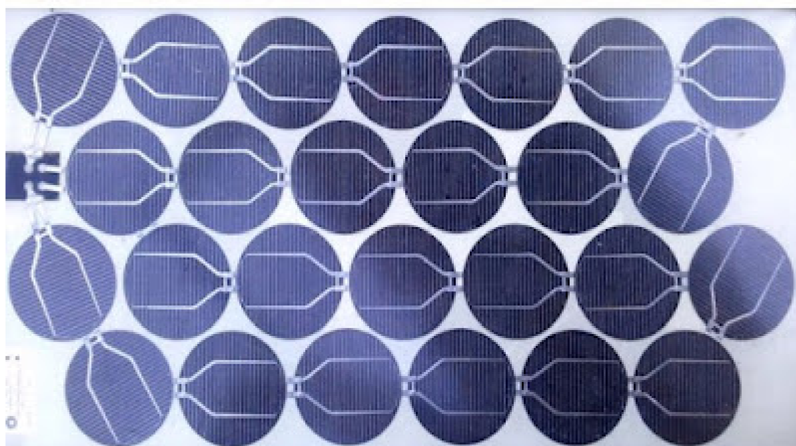
De samenstelling

Deze cellen bestaan uit een plakje van 200 á 400 µm dikte, dat uit een zeer zuiver en groot gegroeid kristal van silicium is geslepen. Na het doteren van de plakjes met donor- en acceptor-materialen wordt er, zie de onderstaande figuur, aan weerszijden een metalen elektrode op opgedampt. De twee elektroden kunnen worden aangesloten op een verbruiker. Omdat het uiteraard de bedoeling is dat de fotonen zo ongehinderd mogelijk in het silicium kunnen invallen, bestaat de bovenste elektrode uit een kam- of rastervormige structuur van uiterst dunne baantjes opgedampt metaal. De onderste elektrode zorgt voor de reflecterende eigenschappen van de cel. Dat is noodzakelijk voor het verhogen van het rendement. Energierijke fotonen dringen door tot deze onderste elektrode en worden teruggekaatst naar de silicium chip. Zonder de hoogreflecterende eigenschappen van de onderste elektrode zouden deze fotonen niet worden teruggekaatst, maar worden geabsorbeerd door de elektrode. Het gevolg zou zijn dat de zonnecel zeer warm wordt, hetgeen niet gunstig is. Om de een of andere fysische reden neemt namelijk het rendement van zonnecellen met 0,5 % af per graad temperatuursverhoging! Zonnecellen moeten dus zo koel mogelijk toegepast worden.
Zonnecellen uit monokristallijn silicium hebben een zeer hoog rendement van rond de 20 %, maar zijn zeer duur en kwetsbaar. De hoge prijs is een gevolg van het feit dat het nog steeds zeer moeilijk is zeer zuivere monokristallijne kristallen te trekken uit vloeibaar silicium.



De samenstelling van een monokristallijne cel.
(© 2024 Jos Verstraten)

Monokristallijne zonnepanelen
Monokristallijne zonnepanelen kunt u niet alleen herkennen aan hun donkere kleur. De toegepaste PV-cellen zijn niet vierkant maar cirkelvormig of voorzien van afgeronde zijden. Dit komt door het reeds besproken smeltproces waarbij het gekristalliseerde silicium een cilindervorm heeft waaruit de PV-cellen worden gesneden. De eerste monokristallijne zonnepanelen bestonden uit helemaal ronde zonnecellen, zie de onderstaande foto, maar hierbij gaat uiteraard veel oppervlakte verloren tussen de zonnecellen.



De allereerste zonnepanelen met monokristallijne cellen.
(© zonnepanelenenergie.be)

Om dit verlies te verminderen worden de ronde cellen tegenwoordig bijgesneden, zodat een soort van vierkant ontstaat met afgeronde hoeken. Er wordt dan heel wat kostbaar Si-materiaal weggegooid, maar het resultaat is een heel compact zonnepaneel met een hoog rendement.



Een bijgesneden monokristallijne cel
(© zonneplan.nl)

Het rendement van monokristallijne cellen
Omdat monokristallijne cellen zijn gemaakt van een zuiver siliciumkristal kunnen elektronen vrijer bewegen, wat leidt tot minder weerstand en energieverlies. De uniforme kristalstructuur zorgt voor minder defecten in het materiaal, waardoor de cellen beter in staat zijn om zonlicht om te zetten in elektriciteit. Het rendement van een monokristallijne PV-cel ligt tussen 18 % en 24 %, afhankelijk van de technologie en kwaliteit van de cel.
Moderne technologische ontwikkelingen zoals '*PERC*' (***P****assivated* ***E****mitter and* ***R****ear* ***C****ell*) verhogen het rendement met een paar procent door het lichtverlies te minimaliseren.

Wat is PERC (Passivated Emitter and Rear Cell)?
Dit is een technologie die tegenwoordig standaard is in moderne monokristallijne cellen en die de efficiëntie van PV-cellen verhoogt door een extra laag op de achterkant van de cel aan te brengen. Deze laag heeft verschillende functies die helpen om meer zonlicht om te zetten in elektriciteit. Bij standaard PV-cellen gaat een deel van de fotonen door de cel zonder een botsing te veroorzaken met een atoom. Bij PERC-cellen wordt een passiveringslaag aan de achterkant van de cel aangebracht die voorkomt dat dit licht ontsnapt. Deze laag reflecteert het niet-geabsorbeerde licht, waardoor dit een tweede kans krijgt om door de cel te worden geabsorbeerd. Elektronen en gaten die ontstaan door de botsing tussen een foton en een atoom kunnen bij standaard zonnecellen recombineren voordat ze elektriciteit genereren, wat energieverlies veroorzaakt. PERC-cellen hebben een structuur die deze recombinatie minimaliseert waardoor meer elektronen bijdragen aan de elektriciteitsproductie.

Voordelen van monokristallijne cellen

- Het grootste voordeel aan monokristallijne zonnepanelen is het hoge rendement. Voor een zonnepaneel met zestig PV-cellen vertaalt dat zich in een opbrengst van 270 Wp tot 330 Wp, met uitschieters tot zelfs 370 Wp.
- Vaak kiezen mensen voor monokristallijne zonnepanelen vanwege een esthetisch aspect. Door hun donkere kleur zijn ze meer geschikt voor donkere daken. Fabrikanten spelen hier handig op in door zogenaamde '*all black*' zonnepanelen aan te bieden waarbij ook de backsheet (achterkant) en het frame zwart worden afgewerkt.

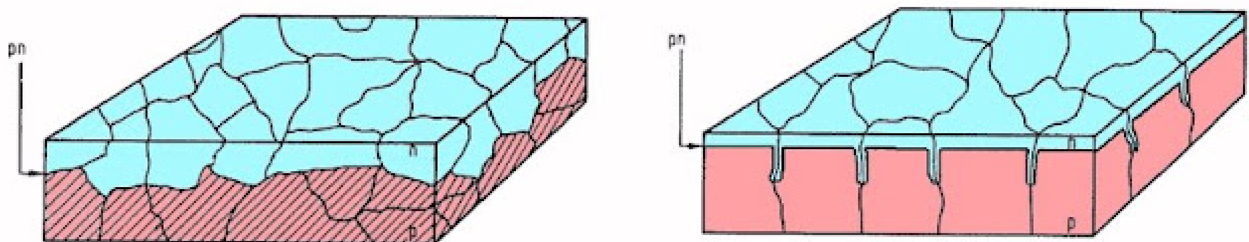
- Voor kleine daken met minder oppervlakte zijn monokristallijne panelen, vanwege hun hoog rendement, de aangewezen oplossing.

Nadelen van monokristallijne cellen

- Het voornaamste nadeel van C-Si cellen is de hoge prijs. Het productieproces is duur, niet alleen vanwege de hogere noodzakelijke temperaturen maar ook vanwege het ingewikkelder kristalvormingsproces dat wel 48 uur kan duren.
- Een tweede nadeel is de grote hoeveelheid restafval bij de productie. Dit wordt veroorzaakt door het bijsnijden aan de vier zijden van de cilindervormige silicium plakken zodat deze een (bijna) vierkante vorm krijgen.

Polykristallijne cellen (MC-Si)

De samenstelling
Als men gesmolten silicium zonder speciale maatregelen laat stollen ontstaan zeer grillig gevormde kristallen. Als men nu in dit materiaal doteringen zou aanbrengen, ontstaat een zeer grillige scheidingslijn tussen het n- en het p-materiaal, zie de linker tekening van de onderstaande figuur. Hoewel dergelijke cellen goedkoop te produceren zijn zou het rendement, vanwege deze grillige scheidingslijn, onaanvaardbaar laag zijn. Door echter het stollen te laten verlopen volgens een zeer nauwkeurig geregelde temperatuurcyclus kan men de kristalgroei onder controle houden. Er ontstaat dan, na dotering, een tamelijk gladde laag (zie rechter tekening), waardoor het rendement van dergelijke zonnecellen vergelijkbaar wordt met dat van de minst goede monokristallijne PV-cellen.



Het vormen van PV-cellen uit polykristallijn silicium. (© 2024 Jos Verstraten)

Het uiterlijk van MC-Si cellen
Dat polykristallijne cellen uit meerdere kristallen bestaan is duidelijk te zien. De cellen lijken uit allemaal kleine stukjes te zijn opgebouwd, bovendien zijn ze anders van kleur, namelijk helder blauw.



Het typisch uiterlijk van MC-Si cellen. (© thuiszonnepanelen.nl)

Voordelen van polykristallijne cellen

- Het eerste voordeel is uiteraard de iets lagere prijs dan deze van monokristallijne cellen. Ze zijn immers goedkoper te produceren dan C-Si cellen omdat het productieproces minder energie-intensief is en minder afval produceert. Bovendien worden deze cellen deels geproduceerd uit de afval van andere processen.
- De lagere productie-energie en het minder intensief gebruik van zuiver silicium maken deze cellen milieuvriendelijker omdat er minder CO_2 vrijkomt tijdens de productie.

Nadelen van polykristallijne cellen

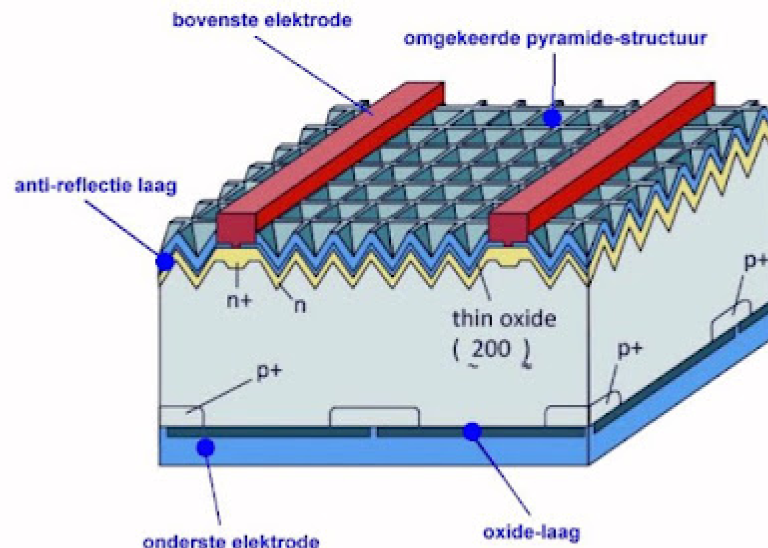
- Zij hebben een lager rendement dan monokristallijne cellen, ongeveer 13 % tot 18 %.
- Ze hebben een blauwachtige gemarmerde uitstraling, sommige mensen vinden dat minder mooi dan de egale donkere kleur van monokristallijne zonnecellen.
- Vanwege de lagere opbrengst moet u meer panelen op uw dak leggen om hetzelfde elektrisch vermogen te oogsten. Dit is een nadeel zijn als de beschikbare ruimte beperkt is.
- Iets waar u op moet letten is dat MC-Si cellen minder presteren bij hoge temperaturen dan C-Si cellen. Bovendien hebben zij een iets kortere levensduur, hun opbrengst gaat sneller achteruit dan die van monokristallijne cellen.

Verbeterde kristallijne cellen

Zeer kwetsbare onderdelen
Het grote nadeel van de standaard kristallijne cellen is dat zij zeer kwetsbaar zijn. Vandaar dat deze cellen nogal wat mechanische nabewerkingen moeten ondergaan om de harde praktijk te overleven. Bovendien absorberen deze cellen maar een gedeelte van het invallende licht, waardoor een deel van de theoretisch mogelijke opbrengst verloren gaat.

De PERL cel
Maar de technologische ontwikkelingen staan uiteraard niet stil! Alle fabrikanten ontwikkelen kleine innovaties die tot doel hebben het rendement te verhogen, de levensduur te verlengen en de fabricage goedkoper te maken. Een van de belangrijkste innovaties in de ontwikkeling van de '*PERL*'-cel. Dat is het letterwoord van '***P**assivated **E**mitter, **R**ear **L**ocally-diffused*'. In de onderstaande figuur ziet u hoe zo'n PV-cel er uitziet.

Deze kristallijne cellen hebben een praktisch rendement van niet minder dan 28 %. Kenmerk van deze cellen is de vrij ingewikkeld oppervlaktestructuur. Deze bevat miljoenen zeer kleine uitsparingen onder de vorm van omgekeerde piramides. Hierdoor ontstaat een grotere effectieve lichtinval bij gelijkblijvende afmetingen. De bovenlaag van de cel is nog eens extra afgedekt met een anti-reflecterende film die er voor zorgt dat de reflectieverliezen tot een minimum worden gereduceerd. Ook de bovenste contactvingers zijn speciaal vormgegeven, zodat verliezen door schaduwen zo veel mogelijk worden vermeden. Bovendien worden beide zijden van de cel nog eens voorzien van een dunne laag zuiver siliciumoxide, waardoor ongewenste recombinaties van ladingsdragers aan de oppervlakte van de cel worden tegengewerkt. Tot slot worden de cellen aangebracht op een stevige drager, waardoor de breekbaarheid een stuk kleiner wordt.
Het zal wel duidelijk zijn dat al deze extra constructieve stappen tot gevolg hebben dat deze cellen zeer prijzig zijn.

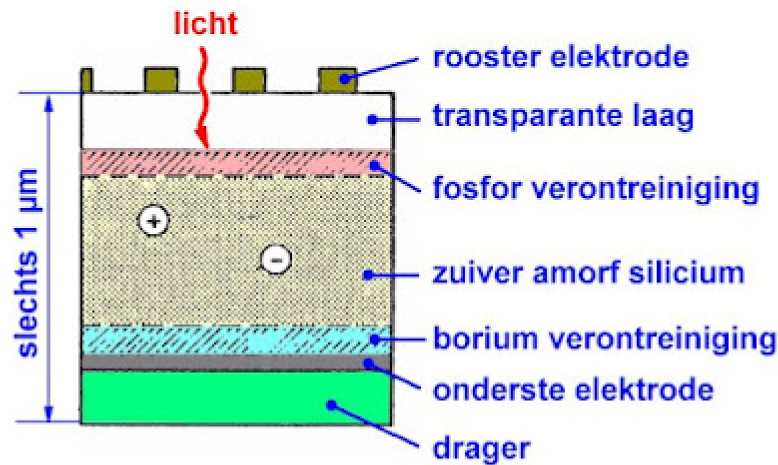


De 'Passivated Emitter, Rear Locally-diffused' PERL-cel.
(© delftxdownloads.tudelft.nl - edit 2024 Jos Verstraten)

Amorfe silicium cellen (A-Si)

Een dunne-film PV-cel

Als men gasvormig silicium laat condenseren op een koude drager, zullen de Si-moleculen zich niet tot kristallen verenigen, maar zal er een amorf laagje stof op de drager neerslaan. Deze amorfe structuur bestaat uit een uiterst fijn en gelijkmatig laagje silicium moleculen, te vergelijken met koolstofpoeder. Bij het neerslaan van het gasvormige silicium kan men bovendien in één procesgang doteren met donor- en met acceptormateriaal. Het volstaat op de juiste momenten gasvormige atomen van deze stoffen toe te voegen aan het gasvormige silicium. De samenstelling van een amorfe zonnecel is getekend in de onderstaande figuur.



De samenstelling van een dunne-film amorfe silicium cel.
(© 2024 Jos Verstraten)

Eerst wordt de onderste metalen elektrode op de drager opgedampt. Nadien wordt een laagje met borium gedoteerd silicium opgedampt. Daarboven komt een laagje zuiver silicium, gevolgd door een laagje met fosfor gedoteerd silicium. Op deze manier ontstaat de halfgeleidende structuur van de cel. Het geheel wordt afgeschermd met een transparant geleidend laagje, waarop via foto-chemische technieken het kamvormige patroon van de bovenste elektrode wordt geëtst.
De gehele constructie, die overigens niet dikker is dan één duizendste van een millimeter (1 µm), kan in weinig stappen worden geproduceerd. Vandaar dat amorfe cellen erg goedkoop gemaakt kunnen worden.
Door de amorfe, doffe structuur van het materiaal wordt veel meer invallend licht geabsorbeerd en weinig teruggekaatst. Toch is het rendement laag, gemiddeld 7 á 9 %.

Voordelen van amorfe silicium cellen

- Deze onderdelen zijn goedkoop te produceren en kunnen op flexibele substraten worden aangebracht. Hierdoor is men in staat dergelijke PV-cellen te integreren in zeer vreemdsoortig gevormde apparaten en constructies. In de onderstaande foto ziet u bijvoorbeeld dergelijke flexibele, zeer dunne zonnepanelen die bestaan uit amorf silicium.
- Amorfe zonnepanelen zijn niet erg gevoelig voor temperatuurverschillen, waardoor zij ook uitstekend werken bij temperaturen van meer dan 25 °C.
- Amorfe PV-cellen leveren meer energie op bij diffuus licht dan kristallijne cellen. Met diffuus licht wordt in dit kader het buitenlicht bedoeld bij een bewolkte lucht. In Nederland is het gemiddeld zestig van de honderd dagen bewolkt.
- Het rendementsverlies door langdurig blootstelling aan licht is deels omkeerbaar. Cellen van amorf silicium vernieuwen zichzelf als ze warm worden.



Een flexibel, zeer dun zonnepaneel dat bestaat uit amorf silicium.
(© warmerhuis.nl)

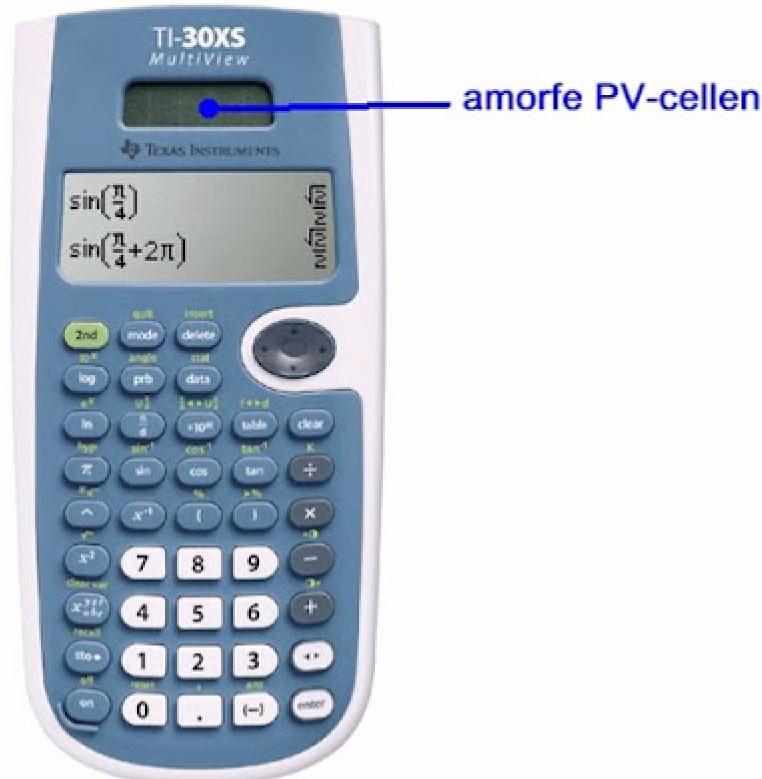
Nadelen van amorfe silicium cellen

- Het rendement van amorfe zonnepanelen is gemiddeld 5 % lager dan dat van monokristallijn zonnepanelen en 16 % lager dan dat van polykristallijne zonnepanelen.
- Hun efficiëntie kan na verloop van tijd afnemen door het Staebler-Wronski-effect.

Het Staebler-Wronski-effect
Dit verschijnsel werd in 1977 ontdekt door David L. Staebler en Christopher R. Wronski. Het treedt van nature op in amorf silicium en heeft een verandering in de fotogeleidbaarheid in de amorfe silicium laag tot gevolg. Deze verandering veroorzaakt een afname van 10 tot 30 % van het rendement van amorf silicium PV-cellen. Er zijn in de loop der jaren verschillende onderzoeken gedaan om het exacte mechanisme van het effect te achterhalen, maar niemand heeft tot nu toe precies kunnen achterhalen waarom het Staebler-Wronski effect optreedt.
Hoewel er geen manier is om deze degradatie te voorkomen, het is immers een natuurkundige eigenschap van het amorfe silicium materiaal, hangt de werkelijke degradatie af van de gebruikte materialen en het fabricageproces.
Het effect treedt onmiddellijk op als de cel wordt blootgesteld aan elektromagnetische straling en hoe intensiever de blootstelling, hoe erger de impact zal zijn. De initiële degradatie gaat vrij snel, maar stabiliseert zich daarna. De maximale degradatie is afhankelijk van de maximale intensiteit van de blootstelling en op welk moment in de levensduur van het paneel die blootstelling plaatsvindt.
Het Staebler-Wronski effect heeft tot gevolg dat u bij commercieel verkrijgbare amorfe zonnepanelen moet rekenen op een degradatie van 10 tot 15 %.
De degenererende effecten worden echter verholpen door de warmte die wordt opgewekt door de IR-straling van de zon in een proces dat gloeien wordt genoemd. Bij hogere temperaturen (60 tot 70 °C) worden de defecten in het amorfe silicium materiaal hersteld en leveren de PV-cellen weer hun initiëel rendement.

Toepassingen van amorfe silicium cellen
Amorfe cellen zult u vaak aantreffen in minder kritische toepassingen, zoals goedkope rekenmachientjes of elektronische weegschalen die rechtstreeks gevoed worden uit

zonnecelletjes. U hebt vast zo'n apparaat in huis, u herkent de A-Si PV-celletjes in een venstertje aan hun typisch donkergrijze uiterlijk.



Een rekenmachine met A-Si PV-celletjes.
(© kantoorspecialist.nl)

Koper, indium en selenium cellen (CIS)

Een moderne dunne-film cel
Een CIS zonnecel is een moderne vertegenwoordiger van de dunne-film cellen. De technologie is gebaseerd op een halfgeleidermateriaal bestaande uit koper (Cu), indium (In), en selenium (Se). Het selenium zorgt ervoor dat de laag een goede gelijkmatige structuur heeft. Het gevolg is dat het aantal plaatsen waarin elektronen en gaten elkaar spontaan opheffen (hercombinatie) klein is. Dat heeft voordelen voor het rendement van de cel.

Eigenschappen van CIS PV-cellen

- CIS-cellen zijn efficiënter dan amorfe silicium cellen, maar iets minder efficiënt dan traditionele kristallijne siliciumcellen.
- Vanwege de dunne-film technologie kunnen CIS-cellen op flexibele ondergronden worden geproduceerd. Dit maakt ze geschikt voor toepassingen zoals draagbare zonnepanelen, zonnepanelen geïntegreerd in gebouwen of zelfs kleding.
- Zij kunnen goedkoper worden geproduceerd dan conventionele kristallijne zonnecellen, voornamelijk omdat er minder materiaal nodig is en ze op grotere oppervlakken kunnen worden vervaardigd met behulp van goedkopere technieken.
- Zij presteren goed in omstandigheden waar weinig direct zonlicht te verwachten is.

Koper, indium, gallium en selenium cellen (CIGS)

CIGS: verzamelnaam voor dunne-film composieten

Onder dit letterwoord wordt een aantal moderne PV-cellen op de markt gebracht die een gemeenschappelijk kenmerk hebben. Er is gallium aan het basismateriaal toegevoegd. Hierdoor kan dit type PV-cel niet worden beschreven met het model van een enkele pn-overgang, want er ontstaan meerdere overgangen. Het toevoegen van gallium verhoogt de bandgap van de CIGS-laag en daarmee ook de elektrische spanning die zo'n cel genereert. In laboratorium omstandigheden werden rendementen behaald van ongeveer 20 %.

De constructie
Deze zonnecellen worden laag na laag opgedampt op een substraat vervaardigd uit glas of een polymeer, waarop een zeer dunne laag van 0,3 tot 0,4 µm molybdeen wordt gecoat. Daarop komt dan een film van 1,5 tot 2,5 µm van het eigenlijke halfgeleider materiaal CIGS. Deze sandwich wordt afgesloten met lagen van cadmiumsulfide en zinkoxide.



Een flexibel CIGS zonnepaneel. (© Wikimedia Commons)

Cadmiumtelluride cellen (CdTe)

Een goedkope dunne-film cel
Cadmiumtelluride (CdTe) is een stabiele kristallijne verbinding gevormd uit de elementen cadmium en tellurium. Onderzoek naar CdTe als bron voor de productie van PV-cellen dateert uit de jaren 1950. Deze technologie leek toen veelbelovend omdat de band gap (~1,5 eV) bijna perfect overeenkomt met de verdeling van fotonen in het zonnespectrum. Er ontstond een eenvoudig te produceren ontwerp waarin p-type CdTe werd gekoppeld aan n-type cadmiumsulfide (CdS). De cel werd voltooid door het toevoegen van boven- en ondercontacten.
Ook deze cellen behoren tot de categorie van dunne-film cellen die goedkoop zijn te maken, maar niet erg effectief. CdTe cellen zijn inderdaad bekend vanwege hun relatief lage productiekosten, omdat ze minder materiaal nodig hebben en het productieproces minder energie-intensief is. Zij worden vaak toepast in grootschalige energieprojecten zoals zonneparken. Zij worden gebruikt in een paar van de grootste fotovoltaïsche energiecentrales ter wereld, zoals de Topaz Solar Farm. In 2013 was de CdTe-technologie goed voor 5,1 % van de wereldwijde PV-productie en goed voor meer dan de helft van de dunne-film markt.



Het Waldpolenz Solar Park in Duitsland maakt gebruik van CdTe PV-modules.
(© Wikimedia Commons)

Voordeel van CdTE-cellen
Als men uitgaat van de te verwachten levensduur van PV-cellen hebben de CdTe-cellen de kleinste CO_2-voetafdruk, het laagste waterverbruik en de kortste terugverdientijd van alle moderne fotovoltaïsche technologieën.

Nadeel van CdTe-cellen
Zij hebben echter één groot nadeel en dat is dat er gebruik wordt gemaakt van het giftige element cadmium. Dat is niet alleen een probleem tijdens de productie maar zeker als de panelen moet worden afgedankt.

Organische fotovoltaïsche cellen (OSC)

Wat zijn organische PV-cellen?
Het idee om organische zonnecellen te maken is ontstaan in de jaren zeventig van de vorige eeuw. Toen werd ontdekt dat de elektrische geleiding van bepaalde polymeren enorm toenam door ze een beetje te verontreinigen met andere chemicaliën. Sinds deze ontdekking zijn geleidende materialen op deze basis toegepast in onder andere LED's en nu dus ook in PV-cellen. Organische materialen zijn heel gemakkelijk te manipuleren, hun eigenschappen zijn aan te passen om tot het ideale materiaal voor een bepaalde toepassing te komen. Organische stoffen zijn bovendien ook wat betreft vorm zeer flexibel en kunnen worden aangebracht op vrijwel elk oppervlak zoals dunne plastic films of zelfs verf. Tot slot is het materiaal zeer goedkoop. Op dit moment bedragen de productiekosten voor een PV-cel op organische basis slechts 10 % van deze van een vergelijkbare PV-cel op silicium basis.

De werking
Zonnecellen op organische basis werken anders dan de tot nu toe besproken zonnecellen. De elektromagnetische straling die wordt geabsorbeerd door een organische cel produceert zogenaamde '*excitonen*'. Dat zijn elektronen en gaten die niet onafhankelijk van elkaar

kunnen bewegen. Omdat het paar aan elkaar gebonden is, kan er geen stroom lopen. Op het grensvlak tussen twee verschillende materialen kan een exciton echter uiteen vallen in een vrij elektron en een bijbehorend vrij gat. Om dit te realiseren moet een organische PV-cel als volgt zijn samengesteld

- positieve elektrode
- elektron donor (materiaal 1)
- elektron acceptor (materiaal 2)
- negatieve elektrode.

Als zonlicht op het materiaal valt en er een exciton ontstaat, kan dit exciton zich naar het grensvlak tussen de twee materialen verplaatsen. Hier valt het uit elkaar in een elektron en een gat. Het elektron verplaatst zich naar de negatieve elektrode en het gat verplaatst zich naar de positieve elektrode. Er gaat dus een stroom lopen en over de cel ontstaat een spanning.
Excitonen kunnen zich meestal maximaal 3 tot 10 nanometer verplaatsen voor ze zichzelf opheffen. De consequentie is dat organische zonnecellen zo dun mogelijk moeten zijn. Hoe dunner immers, hoe groter de kans dat het exciton de grens haalt en gesplitst kan worden. Hieruit volgt dat deze PV-cellen per definitie dunne-film cellen zijn.
Organische PV-cellen worden geproduceerd via goedkope processen zoals printing en coating. Dure en energieverslindende methodes zoals opdampen zijn dus niet nodig.

Voordelen van organische PV-cellen

- Er zijn minder energie-intensieve processen nodig voor de productie en er worden geen zeldzame of giftige materialen gebruikt. Organische PV-cellen hebben dus een kleinere ecologische voetafdruk dan de traditionele Si-cellen.
- Door hun flexibiliteit en doorzichtige eigenschappen kunnen organische zonnecellen bijvoorbeeld worden verwerkt in ramen of designproducten zonder het uiterlijk te verstoren.
- Organische zonnecellen werken uitstekend in omgevingen waar minder licht is, omdat het materiaal niet reflecteert en dus relatief meer licht absorbeert.

Nadelen van organische PV-cellen

- Deze cellen hebben een lager rendement en hebben dus een grotere oppervlakte nodig dan de fotovoltaïsche panelen die van siliciumcellen zijn gemaakt.
- Er is aardolie nodig om de organische basismaterialen te maken.
- Ze hebben een kortere levensduur dan Si-cellen omdat de organische materialen gevoeliger zijn voor degradatie door factoren zoals licht en zuurstof. Zonder UV-filter breekt de organische laag snel af.



Organische PV-cellen in glazen panelen. (© bouw-energie.be)

De toekomst
In de toekomst zullen organische cellen steeds beter worden en steeds meer toepassingen krijgen:

- Energie-opwekkende tenten die zichzelf elektrisch verwarmen.
- Kleding die uw mobiel oplaadt.
- Ramen die elektriciteit opwekken.

Perovskiet cellen (PSC)

Wat is Perovskiet?
Perovskiet is een kristalstructuur die voor het eerst werd ontdekt in het mineraal calcium-titanium-oxide ($CaTiO_3$). Het mineraal perovskiet is voor het eerst beschreven door de Duitse mineraloog Gustav Rose en door hem genoemd naar een Russische collega, L.A. Perovski (1792-1856). Tegenwoordig verwijst het woord '*perovskiet*' echter naar een hele klasse van materialen die dezelfde kristalstructuur hebben als calcium-titanaat, maar met een variabele chemische samenstelling.
De algemene chemische formule voor perovskieten is ABX_3, waarbij:

- A een grote kation is (alkalimetaal of ardalkalimetaal)
- B een kleine kation is (titanium, lood, tin of een overgangsmetaal)
- X meestal zuurstof is, maar ook een halogenide zijn zoals jodium of broom kan zijn.

Afhankelijk van welke atomen in deze formule worden gebruikt, kunnen perovskieten een indrukwekkende reeks interessante eigenschappen hebben, waaronder supergeleiding en zeer grote magnetoresistiviteit. De eigenschappen van perovskieten zijn nog lang niet volledig ontdekt en deze materialen vormen een spannend researchterrein voor fysici, chemici en materiaalwetenschappers.



Het mineraal perovskiet. (© 2010 Robert M. Lavinsky)

Perovskiet PV-cellen
Perovskieten werden voor het eerst met succes gebruikt in PV-cellen in 2012. Synthetische perovskieten vormen een goedkoop basismateriaal voor efficiënte commerciële zonnepanelen. De omzettingscoëfficiënt gaat snel omhoog en had in 2016 al 22 % bereikt. Perovskiet cellen kunnen met bestaande dunne-film technieken worden gefabriceerd. Deze technologie is op dit moment in volle evolutie. Momenteel worden vaak de perovskieten methylammonium tin halides en methylammonium lood halides toegepast voor de productie van PV-cellen. Het produceren van perovskiet cellen is potentieel tegen lage kosten mogelijk,

dankzij de productie-techniek bij lage temperaturen en omdat er geen zeldzame elementen nodig zijn.
De Poolse Olga Malinkiewicz vond in 2014 zelfs een manier uit om met een inkjet printer perovskiet cellen goedkoop op diverse materialen aan te brengen! Dit biedt uiteraard ongekende toekomstige toepassingsmogelijkheden.

De nadelen van perovskiet cellen

- De duurzaamheid van de cellen is momenteel onvoldoende voor commerciële toepassingen, omdat ze zeer gevoelig zijn voor vocht, UV-licht, zuurstof en hoge temperaturen.
- Er bestaat grote bezorgdheid over de giftigheid van de cellen. Gebruik op grote schaal dreigt giftige lood- en tin-verbindingen in het milieu te brengen.
- Om echt lage kosten per watt mogelijk te maken en dus commercieel aantrekkelijk te worden, moeten perovskiet-cellen hoge efficiëntie, lange levensduur en lage productiekosten combineren, wat nog niet mogelijk is. Maar iedereen in de branche gaat er van uit dat dit een kwestie van tijd is.

Kwantum dot cellen (QDSC)

Wat zijn kwantum dot PV-cellen?
Kwantum dot cellen zijn zeer innovatieve PV-cellen die gebruik maken van kwantum stippen (Engels: quantum dots) om zonlicht om te zetten in elektriciteit. Kwantum dots zijn extreem kleine nano-kristallen, vaak maar enkele nanometers groot. Zij bestaan uit halfgeleidermaterialen, die unieke eigenschappen hebben vanwege hun grootte. Wanneer licht op een kwantum dot invalt, worden elektronen in de kwantum dots geëxciteerd naar een hoger energieniveau, waardoor een elektron/gat-paar wordt gecreëerd. Door de extreem kleine afmetingen van het dot zullen die paren vrijwel nooit recombineren, waardoor vrijwel alle elektronen kunnen deelnemen aan de spanning- en stroomproductie. Deze geëxciteerde elektronen kunnen vervolgens door een extern circuit bewegen, waardoor elektrische stroom wordt gegenereerd.

Eigenschappen van kwantum dot PV-cellen
Wat kwantum dot PV-cellen bijzonder maakt, zijn de volgende nogal spectaculaire eigenschappen:

- **Afstembare absorptie-eigenschappen:**
  Kwantum dots kunnen worden afgestemd op verschillende golflengtes in het licht door de grootte van de stippen te variëren. Kleinere stippen absorberen kortere golflengtes (blauw licht), terwijl grotere stippen langere golflengtes (rood licht) absorberen. Door in één cel de grootte van de dots volgens bepaalde patronen te variëren kan men cellen ontwerpen die over een veel breder golflengte-gebied elektrische energie uit de straling kunnen halen dan traditionele Si-cellen. Immers, de helft van de zonne-energie die de aarde bereikt, bevindt zich in het infrarood, het grootste deel in het nabije infrarood gebied. Een kwantum dot zonnecel maakt infrarood energie net zo omzetbaar als elke ander golflengtebereik.
- **Efficiëntie:**
  De theoretische efficiëntie van kwantum dot zonnecellen kan hoger zijn dan die van traditionele silicium-cellen, omdat ze beter in staat zijn energieverlies door warmte te beperken en meerdere elektronen uit een enkel foton kunnen genereren. Vanaf 2022 bedraagt de efficiëntie meer dan 18 %. Kwantum dot zonnecellen hebben echter het potentieel om de maximaal haalbare conversie-efficiëntie te verhogen tot ongeveer 66 %.
- **Flexibiliteit en lage kosten:**
  Kwantum dots kunnen in dunne films worden verwerkt die flexibel zijn en goedkoper

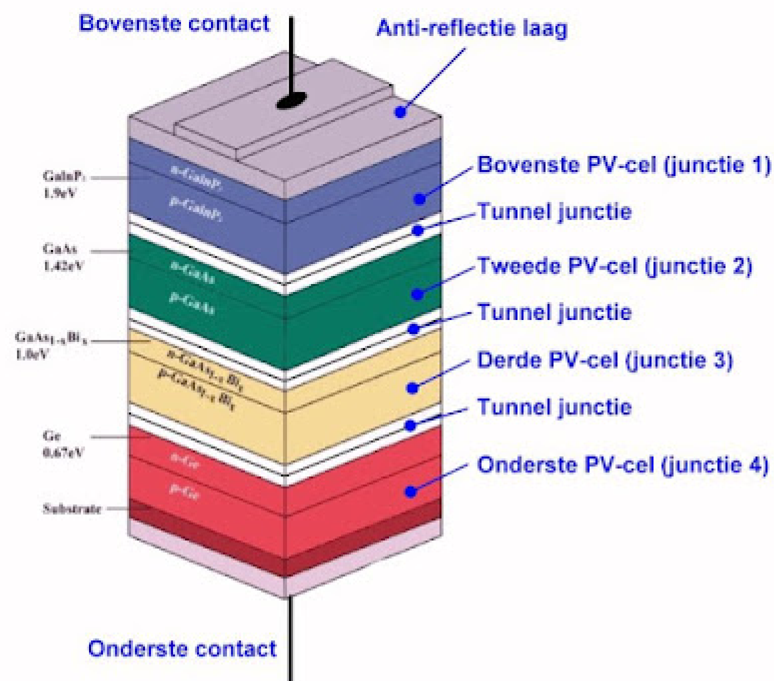
geproduceerd kunnen worden dan traditionele PV-cel technologieën. Ze kunnen bijvoorbeeld worden gedrukt of gespoten op verschillende ondergronden, wat nieuwe toepassingen mogelijk maakt, zoals geïntegreerde zonnepanelen in ramen of draagbare elektronica.

- **Veroudering:**
  Kwantum dot zonnecellen hebben last van degradatie, wat hun levensduur beperkt.
- **Schadelijke materialen:**
  Sommige kwantum dots bevatten giftige materialen zoals cadmium, wat milieuproblemen kan opleveren.

Multi-junction cellen (MJ)

Combineren maar!
Ieder materiaal heeft een bepaald golflengte gebied waarvoor het zeer gevoelig is. Multi-junction PV-cellen maken gebruik van dit gegeven door meerdere pn-overgangen te combineren die zijn gemaakt van verschillende halfgeleidermaterialen. De pn-overgang van elk materiaal produceert elektrische stroom als reactie op en bepaalde golflengte-bandbreedte van het licht. Hierdoor wordt de absorptie van een breder bereik aan golflengten mogelijk, waardoor de efficiëntie van de omzetting van zonlicht in elektrische energie van de cel wordt verbeterd. Laboratorium modellen van multi-junction cellen halen onder geconcentreerd zonlicht een efficiëntie van meer dan 46 %.

Samenstelling
De meeste multi-junction cellen die momenteel worden geproduceerd, gebruiken drie of vier lagen gescheiden door een tunnel junctie. Deze triple of quadruple junction cellen vereisen het gebruik van halfgeleiders die kunnen worden afgestemd op specifieke frequenties. Meestal wordt gebruik gemaakt van galliumarsenide (GaAs) verbindingen, vaak germanium voor de onderste-, GaAs voor de middelste-, en GaInP2 voor de bovenste cel.



Samenstelling van een quadruple junction cel.
(© www.researchgate.net - edit 2024 Jos Verstraten)

Toepassingen
Het zal duidelijk zijn dat multi-junction cellen duur zijn. Vandaar dat zij op dit moment uitsluitend worden gebruikt in toepassingen waar een uiterste efficiëntie van groot belang is en prijs geen rol speelt, zoals in de ruimtevaart.